

**ANALISA PENGARUH KOMBINASI *SLOT-POLE* PADA
SURFACE PERMANENT MAGNET (SPM) GENERATOR
UNTUK APLIKASI TURBIN ANGIN**

SKRIPSI

Diajukan Untuk Memenuhi
Persyaratan Guna Meraih Gelar Strata 1
Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Malang



Disusun oleh :

Nama : Moch. Fattahur Razzaq

NIM : 201410130311004

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MALANG**

2019

LEMBAR PENGESAHAN

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Guna Meraih Gelar Sarjana (S1)
Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Malang

Disusun Oleh:

MOCH FATTAHUR RAZZAQ

NIM : 201410130311004

Tanggal Ujian : 12 Januari 2019

Periode Wisuda : 23 Februari 2019

1. Ir. M. Irfan, MT. (Pembimbing I)
NIDN : 0705106601
2. Ir. Nurhadi, MT. (Pembimbing II)
NIDN : 0731126202
3. Dr. Ir. Ermanu Azizul Hakim, MT. (Penguji I)
NIDN : 0705056501
4. Machmud Effendy, ST., M.Eng. (Penguji II)
NIDN : 0715067402

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro



Ir. Nur Alif Mardiyah, MT.
NIDN : 0718036502

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas berkat dan hikmat yang diberikan, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan judul :

“ANALISA PENGARUH KOMBINASI SLOT-POLE PADA SURFACE PERMANENT MAGNET GENERATOR (SPM) UNTUK APLIKASI TURBIN ANGIN”

Dalam mewujudkan semua yang lebih baik, kami selalu berhadapan dengan segala macam hambatan. Tidak lain halnya dalam pembuatan Laporan Tugas Akhir ini, banyak hambatan yang harus penulis dapat lewati, tetapi berkat bantuan dari beberapa pihak akhirnya penulis dapat melampauinya dengan baik dan benar.

Penulis menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna, dikarenakan terbatasnya pengetahuan dan ketrampilan yang penulis miliki. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun dari seluruh pihak sangat diharapkan untuk perbaikan Tugas Akhir ini. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak. Amin.

Malang, 12 Januari 2019

Moch Fattahur Razzaq

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PERSETUJUAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
LEMBAR PERSEMBAHAN	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GRAFIK	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Prinsip Dasar Generator	5
2.2 Magnet Permanen dan Eksitasi Elektromagnetik	6
2.3 Bagian-Bagian Generator	7
2.3.1 Stator	7
2.3.1 Rotor	7
2.3.1 Airgap	8
2.4 Jenis Generator Sinkron dan Magnet Permanen	8
2.4.1 Berdasarkan Aliran Fluks Magnetik	8
2.4.2 Berdasarkan Hubungan Stator dan Rotor	9
2.5 Jenis Lilitan	10

2.6	Kombinasi Slot dan Pole	10
2.7	Dimensi Utama Generator Magnet Permanen	11
2.8	Ukuran Stator dan Rotor	11
2.9	Desain Ukuran Magnet	14
2.10	Menghitung Luas Area Kumpanan	15
2.11	Konversi Daya dan Torsi Generator	16
2.12	Metode Finite Element	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		18
3.1	Pemilihan Material	18
3.1.1	Material Laminasi Inti	18
3.1.2	Material Magnet Permanen	19
3.2	Perhitungan Desain Referensi	20
3.2.1	Perhitungan Dimensi Utama	20
3.2.2	Perhitungan Desain Stator dan Rotor	21
3.2.3	Perhitungan Desain Magnet Permanen	22
3.2.4	Menghitung Luas Kumpanan	23
3.3	Hasil Desain Geometri	24
3.4	Pengembangan Desain PMSG	25
3.5	Pengaturan Simulasi Variasi Kecepatan	26
3.6	Pengaturan Simulasi Tanpa Beban dan Dengan Beban	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		30
4.1	Hasil Desain Model PMSG 12 Slot 8 Pole	32
4.1.1	Hasil Simulasi dalam Kondisi Tanpa Beban pada Model 12S8P	34
4.1.2	Hasil Simulasi dalam Kondisi Dengan Beban pada Model 12S8P	36
4.2	Hasil Desain Model PMSG 12 Slot 10 Pole	39
4.2.1	Hasil Simulasi dalam Kondisi Tanpa Beban pada Model 12S10P	41
4.2.2	Hasil Simulasi dalam Kondisi Dengan Beban pada Model 12S10P	42
4.3	Hasil Desain Model PMSG 12 Slot 16 Pole	45
4.3.1	Hasil Simulasi dalam Kondisi Tanpa Beban pada Model 12S16P	47
4.3.2	Hasil Simulasi dalam Kondisi Dengan Beban pada Model 12S16P	49
4.4	Hasil Desain Model PMSG 15 Slot 8 Pole	51
4.4.1	Hasil Simulasi dalam Kondisi Tanpa Beban pada Model 15S8P	53

4.4.2	Hasil Simulasi dalam Kondisi Dengan Beban pada Model 15S8P ...	55
4.5	Hasil Desain Model PMSG 15 Slot 10 Pole	58
4.5.1	Hasil Simulasi dalam Kondisi Tanpa Beban pada Model 15S10P ...	60
4.5.2	Hasil Simulasi dalam Kondisi Dengan Beban pada Model 15S10P .	62
4.6	Hasil Desain Model PMSG 15 Slot 16 Pole	64
4.6.1	Hasil Simulasi dalam Kondisi Tanpa Beban pada Model 15S16P ...	66
4.6.2	Hasil Simulasi dalam Kondisi Dengan Beban pada Model 15S16P .	68
4.7	Hasil Desain Model PMSG 18 Slot 8 Pole	71
4.7.1	Hasil Simulasi dalam Kondisi Tanpa Beban pada Model 18S8P	73
4.7.2	Hasil Simulasi dalam Kondisi Dengan Beban pada Model 18S8P ...	74
4.8	Hasil Desain Model PMSG 18 Slot 10 Pole	77
4.8.1	Hasil Simulasi dalam Kondisi Tanpa Beban pada Model 18S10P ...	79
4.8.2	Hasil Simulasi dalam Kondisi Dengan Beban pada Model 18S10P .	81
4.9	Hasil Desain Model PMSG 18 Slot 16 Pole	84
4.9.1	Hasil Simulasi dalam Kondisi Tanpa Beban pada Model 18S16P ...	87
4.9.2	Hasil Simulasi dalam Kondisi Dengan Beban pada Model 18S16P .	88
4.10	Perbandingan Model dan Pemilihan Model	91
4.10.1	Perbandingan Fluks Linkage	91
4.10.2	Perbandingan Tegangan dalam Kondisi Tanpa Beban	92
4.10.3	Perbandingan Daya Output Setiap Model	93
4.10.4	Pemilihan Model	93
BAB V	PENUTUP	97
5.1	Kesimpulan	97
5.2	Saran	98
DAFTAR PUSTAKA	99
LAMPIRAN	100

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Konduktor Melalui Medan Magnet Secara Tegak Lurus	5
Gambar 2.2	Ilustrasi Gerak Melingkar dari Generator	6
Gambar 2.3	(a) Generator Magnet Permanen (b) Generator Eksitasi Elektromagnetik	6
Gambar 2.4	Bagian-Bagian Generator	8
Gambar 2.5	(a) Radial Fluks Generator (b) Axial Fluks Generator	9
Gambar 2.6	(a) Inner Rotor (b) Outer Rotor	9
Gambar 2.7	(a) Distributed Winding (b) Concentrated Winding.....	10
Gambar 2.8	Kerangka Stator	13
Gambar 2.9	Kerangka Rotor	15
Gambar 2.10	Diagram Power Flow Generator	17
Gambar 3.1	Kurva Magnetik Laminasi Inti Material M250-50A	19
Gambar 3.2	Diagram Skematik Karakteristik B-H Material Magnet Permanen	20
Gambar 3.3	Hasil Desain Geometri PMSG 12 Slot 8 Pole	24
Gambar 3.4	Desain Generator Tampilan 3 Dimensi	25
Gambar 3.5	Tampilan Tools Motion Component	27
Gambar 3.6	Tampilan Menu Position	27
Gambar 3.7	Tampilan Pengisian Nilai pada Table Time dan Speed	28
Gambar 3.8	Rangkaian Simulasi Tanpa Beban	28
Gambar 3.9	Rangkaian Simulasi Dengan Beban	29
Gambar 4.1	Model PMSG 12 Slot 8 Pole	32
Gambar 4.2	Diagram Konfigurasi Lilitan 12S8P	33
Gambar 4.3	Aliaran Fluks Magnetik pada Model 12S8P	33
Gambar 4.4	Gelombang Fluks Linkage Model 12S8P	34
Gambar 4.5	Tegangan Fasa Model 12S8P	34
Gambar 4.6	Tegangan Antar Fasa Model 12S8P	35

Gambar 4.7	Hasil Output Simulasi Model 12S8P dengan Beban 100 Ohm pada Kecepatan 1.000 Rpm (a) Tegangan (b) Arus (c) Torsi	37
Gambar 4.8	Model PMSG 12 Slot 10 Pole	39
Gambar 4.9	Diagram Konfigurasi Lilitan 12S10P.....	39
Gambar 4.10	Aliaran Fluks Magnetik pada Model 12S10P	40
Gambar 4.11	Gelombang Fluks Linkage Model 12S10P	40
Gambar 4.12	Tegangan Fasa Model 12S10P	41
Gambar 4.13	Tegangan Antar Fasa Model 12S10P	41
Gambar 4.14	Hasil Output Simulasi Model 12S10P dengan Beban 100 Ohm pada Kecepatan 1.000 Rpm (a) Tegangan (b) Arus (c) Torsi	43
Gambar 4.15	Model PMSG 12 Slot 16 Pole	45
Gambar 4.16	Diagram Konfigurasi Lilitan 12S16P.....	45
Gambar 4.17	Aliaran Fluks Magnetik pada Model 12S16P	46
Gambar 4.18	Gelombang Fluks Linkage Model 12S16P	46
Gambar 4.19	Tegangan Fasa Model 12S16P	47
Gambar 4.20	Tegangan Antar Fasa Model 12S16P	47
Gambar 4.21	Hasil Output Simulasi Model 12S16P dengan Beban 100 Ohm pada Kecepatan 1.000 Rpm (a) Tegangan (b) Arus (c) Torsi	49
Gambar 4.22	Model PMSG 15 Slot 8 Pole	51
Gambar 4.23	Diagram Konfigurasi Lilitan 15S8P.....	52
Gambar 4.24	Aliaran Fluks Magnetik pada Model 15S8P	52
Gambar 4.25	Gelombang Fluks Linkage Model 15S8P	53
Gambar 4.26	Tegangan Fasa Model 15S8P	53
Gambar 4.27	Tegangan Antar Fasa Model 15S8P	54
Gambar 4.28	Hasil Output Simulasi Model 15S8P dengan Beban 100 Ohm pada Kecepatan 1.000 Rpm (a) Tegangan (b) Arus (c) Torsi	56
Gambar 4.29	Model PMSG 15 Slot 10 Pole	58
Gambar 4.30	Diagram Konfigurasi Lilitan 15S10P.....	58
Gambar 4.31	Aliaran Fluks Magnetik pada Model 15S10P	59
Gambar 4.32	Gelombang Fluks Linkage Model 15S10P	59
Gambar 4.33	Tegangan Fasa Model 15S10P	60

Gambar 4.34	Tegangan Antar Fasa Model 15S10P	60
Gambar 4.35	Hasil Output Simulasi Model 15S10P dengan Beban 100 Ohm pada Kecepatan 1.000 Rpm (a) Tegangan (b) Arus (c) Torsi	62
Gambar 4.36	Model PMSG 15 Slot 16 Pole	64
Gambar 4.37	Diagram Konfigurasi Lilitan 15S16P	65
Gambar 4.38	Aliaran Fluks Magnetik pada Model 15S16P	65
Gambar 4.39	Gelombang Fluks Linkage Model 15S16P	66
Gambar 4.40	Tegangan Fasa Model 15S16P	66
Gambar 4.41	Tegangan Antar Fasa Model 15S16P	67
Gambar 4.42	Hasil Output Simulasi Model 15S16P dengan Beban 100 Ohm pada Kecepatan 1.000 Rpm (a) Tegangan (b) Arus (c) Torsi	69
Gambar 4.43	Model PMSG 18 Slot 8 Pole	71
Gambar 4.44	Diagram Konfigurasi Lilitan 18S8P	71
Gambar 4.45	Aliaran Fluks Magnetik pada Model 18S8P	72
Gambar 4.46	Gelombang Fluks Linkage Model 18S8P	72
Gambar 4.47	Tegangan Fasa Model 18S8P	73
Gambar 4.48	Tegangan Antar Fasa Model 18S8P	73
Gambar 4.49	Hasil Output Simulasi Model 18S8P dengan Beban 100 Ohm pada Kecepatan 1.000 Rpm (a) Tegangan (b) Arus (c) Torsi	75
Gambar 4.50	Model PMSG 18 Slot 10 Pole	77
Gambar 4.51	Diagram Konfigurasi Lilitan 18S10P	77
Gambar 4.52	Aliaran Fluks Magnetik pada Model 18S10P	78
Gambar 4.53	Gelombang Fluks Linkage Model 18S10P	79
Gambar 4.54	Tegangan Fasa Model 18S10P	79
Gambar 4.55	Tegangan Antar Fasa Model 18S10P	80
Gambar 4.56	Hasil Output Simulasi Model 18S10P dengan Beban 100 Ohm pada Kecepatan 1.000 Rpm (a) Tegangan (b) Arus (c) Torsi	82
Gambar 4.57	Model PMSG 18 Slot 16 Pole	84
Gambar 4.58	Diagram Konfigurasi Lilitan 18S16P	84
Gambar 4.59	Aliaran Fluks Magnetik pada Model 18S16P	85
Gambar 4.60	Gelombang Fluks Linkage Model 18S16P	85

Gambar 4.61	Tegangan Fasa Model 18S16P	86
Gambar 4.62	Tegangan Antar Fasa Model 18S16P	86
Gambar 4.63	Hasil Output Simulasi Model 18S16P dengan Beban 100 Ohm pada Kecepatan 1.000 Rpm (a) Tegangan (b) Arus (c) Torsi	88



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Tipe Propertis Magnetik Material M250-50A pada 50 Hz	18
Tabel 3.2	Parameter Awal Perhitungan Dimensi Generator	20
Tabel 4.1	Parameter Hasil Perhitungan Dimensi Generator	30
Tabel 4.2	Parameter Pengujian Variasi Kecepatan	31
Tabel 4.3	Data Waktu Variasi Kecepatan	31
Tabel 4.4	Konfigurasi Lilitan Model PMSG 12 Slot 8 Pole	33
Tabel 4.5	Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan Model 12S8P	35
Tabel 4.6	Data Hasil Simulasi Variasi Beban dengan Variasi Kecepatan pada Model 12S8P	37
Tabel 4.7	Konfigurasi Lilitan Model PMSG 12 Slot 10 Pole	39
Tabel 4.8	Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan Model 12S10P	42
Tabel 4.9	Data Hasil Simulasi Variasi Beban dengan Variasi Kecepatan pada Model 12S10P	44
Tabel 4.10	Konfigurasi Lilitan Model PMSG 12 Slot 16 Pole	46
Tabel 4.11	Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan Model 12S16P	48
Tabel 4.12	Data Hasil Simulasi Variasi Beban dengan Variasi Kecepatan pada Model 12S16P	50
Tabel 4.13	Konfigurasi Lilitan Model PMSG 15 Slot 8 Pole	52
Tabel 4.14	Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan Model 15S8P	54
Tabel 4.15	Data Hasil Simulasi Variasi Beban dengan Variasi Kecepatan pada Model 15S8P	56
Tabel 4.16	Konfigurasi Lilitan Model PMSG 15 Slot 8 Pole	58
Tabel 4.17	Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan Model 15S8P	61
Tabel 4.18	Data Hasil Simulasi Variasi Beban dengan Variasi Kecepatan pada Model 15S10P	63
Tabel 4.19	Konfigurasi Lilitan Model PMSG 15 Slot 10 Pole	65

Tabel 4.20 Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan Model 15S10P	67
Tabel 4.21 Data Hasil Simulasi Variasi Beban dengan Variasi Kecepatan pada Model 15S10P	69
Tabel 4.22 Konfigurasi Lilitan Model PMSG 15 Slot 16 Pole	71
Tabel 4.23 Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan Model 15S16P	74
Tabel 4.24 Data Hasil Simulasi Variasi Beban dengan Variasi Kecepatan pada Model 15S16P	76
Tabel 4.25 Konfigurasi Lilitan Model PMSG 18 Slot 8 Pole	78
Tabel 4.26 Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan Model 18S8P	80
Tabel 4.27 Data Hasil Simulasi Variasi Beban dengan Variasi Kecepatan pada Model 18S8P	82
Tabel 4.28 Konfigurasi Lilitan Model PMSG 18 Slot 16 Pole	84
Tabel 4.29 Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan Model 18S16P	87
Tabel 4.30 Data Hasil Simulasi Variasi Beban dengan Variasi Kecepatan pada Model 18S16P	89
Tabel 4.31 Perbandingan Nilai Fluks Linkage Setiap Model	90
Tabel 4.32 Perbandingan Hasil Rata-Rata Pengujian Arus dan Efisiensi dengan Variasi Beban dan Kecepatan pada Setiap Model	93

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1 Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan (12S8P)	36
Grafik 4.2 Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan (12S10P) ..	42
Grafik 4.3 Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan (12S16P) ..	48
Grafik 4.4 Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan (15S8P)	55
Grafik 4.5 Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan (15S10P) ..	61
Grafik 4.6 Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan (15S16P) ..	68
Grafik 4.7 Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan (18S8P)	74
Grafik 4.8 Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan (18S10P) ..	81
Grafik 4.9 Perbandingan Tegangan Vrms pada Variasi Kecepatan (18S16P) ..	87
Grafik 4.10 Tegangan Rms Antar Fasa dan Tegangan Rms Fasa Setiap Model Pada Kecepatan 1.000 Rpm	91
Grafik 4.11 Daya Output Setiap Model pada Kecepatan 1.000 Rpm dan Beban 100 Ohm	92

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Aslan, B., Semail, E., Korecki, J., and Legranger, J., "Slot/pole Combinations Choice for Concentrated Multiphase Machines dedicated to Mild-Hybrid Applications." *IECON'11, IEEE International Conference On Industrial Applications of Electronics*, Nov 2011, Australia. IEEE, pp.3698-3703, 2011,
- [2]. Sun, T., Kim, J-M., Lee, G-H., Hong, J-P., Choi, M-R., "Effect of Pole and Slot Combination on Noise and Vibration in Permanent Magnet Synchronous Motor", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 5, pp. 1038-1041, May 2011
- [3]. Zhang, Y., Wang, F., "Choice of Pole-Slot Number Combination for PM Generator Direct-Driven by Wind Turbine", *2008 Joint International Conference on Power System Technology*, pp. 1-4, Oct 2008
- [4]. Dogan, H., Wurtz, F., Foggia, A., and Garbuio, L., "Analysis of Slot-Pole Combination of Fractional-Slots PMSM for Embedded Applications", *ACEMP 2011*, Sep 2011, Turkey. pp.627-631, 2011.
- [5]. Choi, J-Y., Park, Y-S., Jang, S-M., " Experimental Verification and Electromagnetic Analysis for Performance of Interior PM Motor According to Slot/Pole Number Combination", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No. 2, pp. 987-990, February 2012
- [6]. D.Young, Hugh. dan A.Freedman, Roger., "*University Physics with Modern Physics 14th edition*", Pearson Education, United States of America, Ch. 21, 2016
- [7]. Edwards, J.D., "*Course in Electromechanics, Year I*", 2004.
- [8]. Gieras, J.F., Wing, M., "*Permanent Magnet Technology*", United States of America, 2002
- [9]. Kilmartin, J., "*Effects of Pole-Slot Combination on a Surface Permanent Magnet Generator for Wind Applications*", MSc. Thesis Report, Flinders University, Oct 2016

- [10]. Hendershot, J.R. Jr and Miller, T.J.E., “*Design of Brushless Permanent Magnet Motors.*” Oxford: Magna physics publishing and Clarendon press. 1994
- [11]. Irasari, P., Alam, H.S., Kasim, M., “*Analytical Design Method of 3 Kw, 200 RPM Permanent Magnet Generator for Renewable Energy Power Plant Applications.*” Research Center for Electrical Power and Mechatronics, Indonesian Institute of Sciences 12. 2013
- [12]. Sobhi-Najafabadi, B., “*An Enhanced Methodology for Permanent Magnet Design*”, MSc. Thesis Report, University of South Australia, Australia 1997
- [13]. Suhada, Octa Meggy., “*Analisa Rancangan Generator Magnet Permanen Fluks Radial Kecepatan Rendah Berbasis MagNet 7.5*” Universitas Riau, 2018
- [14]. Hanselman, Dr.Duane., “*Brushless Permanent Magnet Motor Design 2nd edition*” Magna Physics Publishing, Ch.10, 2003
- [15]. Skaar, S.E., Krovel., Nilssen, R., “*Distribution, Coil-span and Winding Factor for PM Machines with Concentrated Windings.*” Norwegian Research Council under Grant 146524/210, Norwegian, June 2006.